2009 年　9 月 作成
2010 年 1 月 再改訂
2010 年 9 月 改訂 2

ハードウエア実験Ⅱ

センサ編

実験立上げ：　情報ｻｲｴﾝｽ学科（千葉）　末澤 慶孝
情報ｻｲｴﾝｽ学科（池袋）　藤井 慎裕
資料取纏め，文責：
情報ｻｲｴﾝｽ学科（千葉）　藤村 貞夫
2010 年度実験用改版：
情報ｻｲｴﾝｽ学科（千葉）　小林　郁夫

【目次】

１．センサ実験
２．実験の進め方，注意事項
３．使用センサ素子
４．実験手順

このテキストは，ハードウエア実験を実施するための基礎的事項や，実験手順などを示したものである．要点のみを記述してあるので，必要に応じて参考書を調べるなどして，よく予習しておくこと．それでも不明な点はメモしておいて質問し，十分に理解した上で実験に臨むように．

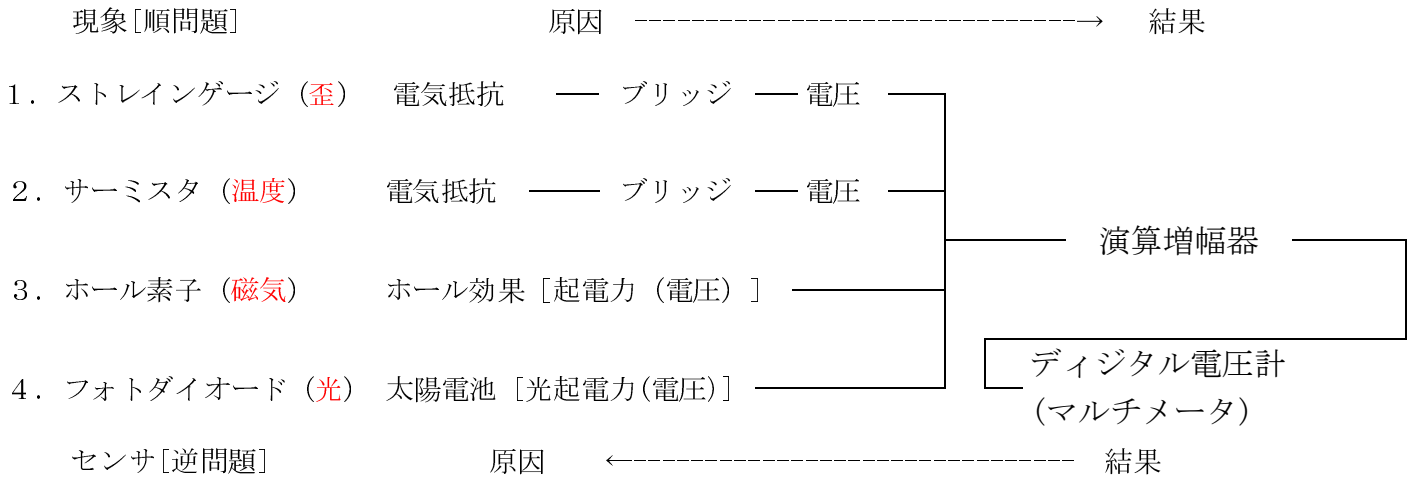
実験では，出席が必須である．出席して実際に装置などを操作しデータを得ることが出発点である．病気など止むを得ない理由で欠席する場合には，できるだけ事前に，そうでなくても，事後直ちに，担当教員に報告すること［教務係にも届ける］．連絡のない場合には補充実験の実施を認めない．

1．センサ実験

1.1 実験概要

本センサ実験では，物理現象を利用して，物理量を電気量（電圧）に変換し，電圧から元の物理量の大きさを知るというセンサで用いられる基本的関係を明らかにする．現象は原因から結果へと進む（順方向）が，センサや計測では結果（電圧の大きさ）を知って原因（物理量の大きさ）を求める（逆方向）ことになる．原因を与えて結果を明らかにすることを「**順問題**を解く」という言い方で表現することもある．逆に，結果から原因を求めることを「**逆問題**を解く」と表現する．センサで情報を得る（逆問題を解く）ためには，「順問題」が解かれていなければならない．

本実験では，分かった大きさの物理量（原因 「制御変数」とも呼ぶ）を与えて，結果として得られる電圧の大きさを求めるという，センサの基本となる因果関係を明らかにする［順問題を解く］． 以下に，各実験における原因と結果（因果）の関係を示す．



実際の実験で，制御する量（原因）と読取り量，出力変数（電圧）の関係を示すと，以下のようになる．

現象［順］	原因［制御変数］	読取り量　　→	結果
1．ストレインゲージ	荷重	押し秤読み（横軸）	出力電圧（縦軸）
2．サーミスタ	温度	棒温度計読み（横軸）	出力電圧（縦軸）
3．ホール素子	磁界	物差読み［距離］（横軸）	出力電圧（縦軸）
4．フォトダイオード	照度	照度計読（横軸）	出力電圧（縦軸）

（）内はグラフを描くときの軸を示す。

1.2 センサの動作原理

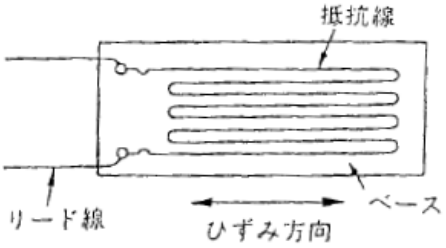
(1) ストレインゲージ

金属や半導体の線材のもつ抵抗値Ｒは，線材の比抵抗（抵抗率）をρ［Ωm］，長さをＬ［m］，断面積をＳ［m^2］として，　　Ｒ＝　ρＬ／Ｓ　　で表される．

ストレインゲージに用いられる抵抗線（金属線）は弾性板に貼り付けられており，弾性板の変形（歪）により引き延ばされたり，圧縮されたりする．

このとき，抵抗線の長さの変化分をΔＬとすると，歪みの大きさεは　ε＝ΔＬ／Ｌ　となる．これに伴う比抵抗の変化分をΔρ，断面積の変化分をΔＳとすると，抵抗値Ｒの変化分ΔＲとＲの比はΔＲ／Ｒ　＝　Δρ／ρ　＋　ΔＬ／Ｌ　－　ΔＳ／Ｓ　となる．

金属線の場合，Δρ／ρ　は他の項に対して無視できる．
一方，ΔＬとΔＳの間には，ポワソン比σを用いて，
ΔＳ／Ｓ＝－2σ（ΔＬ／Ｌ）なる関係があり，
ΔＲ／Ｒ＝（1＋2σ）（ΔＬ／Ｌ）　と表される．
(1＋２σ)をゲージファクタと呼び，金属のσはほぼ 0.3 であるが，実際のゲージファクタは約２となる．



金属線ストレインゲージの構造

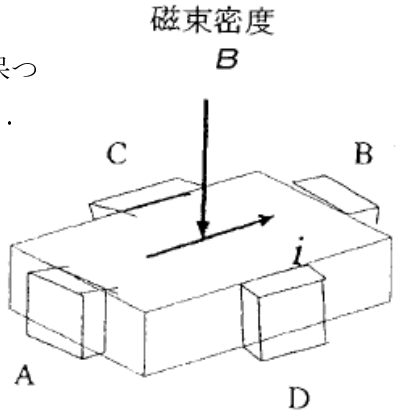
(4) ホール効果

半導体試料を図に示す形状に加工する．Ａ～Ｄは電極端子である．電極ＡＢ間に電流を流し，試料面に垂直に磁界を加えると端子ＣＤ間に起電力（電圧）が生じる．これがホール効果である．

今，電荷ｑをもつ粒子が速度 $\boldsymbol{v}$ で移動して電流 $\boldsymbol{i}$ が流れ，電流 $\boldsymbol{i}$ と直交して磁界（磁束密度 $\boldsymbol{B}$）が加えられるものとする．　このとき，粒子には，×をベクトル積を表すものとして，　　$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{i} \times \boldsymbol{B}$　　で与えられる力 $\boldsymbol{F}$ が働き，荷電粒子の軌跡が曲げられる．ここで，力 $\boldsymbol{F}$ の大きさ｜$\boldsymbol{F}$｜は　｜$\boldsymbol{F}$｜＝　｜$\boldsymbol{i}$｜｜$\boldsymbol{B}$｜＝　iB　で与えられる．

たとえば，ｑ＞０で，力が端子Ｃの方に向いているとすれば，端子Ｃ側に正の電位が生じ，これによる電界で粒子を下方に押す（元に戻す）力が生じる．

平衡状態では $\boldsymbol{F}$ による効果を打ち消し，粒子の軌道を一定に保つような電界（＝CD 間の電圧 V／電極 CD 間の距離 d）が発生する．
このとき，　$qV/d \propto iB$　　$\therefore$　$V \propto iB$
すなわち，　$V=k\ iB$　　（k：比例定数）　となり，
起電力の大きさから磁界の強さ（磁束密度の大きさ）が求められる．



Hall 素子
A, B, C, D：電極
AB ⊥ CD　$B \perp i$（電流）

(2) サーミスタ

(3) フォトダイオード

両者は半導体の性質を利用したセンサである．半導体は，電気的には，金属などの良導体とダイアモンドなどの絶縁体（不良導体）の中間的な性質をもつ．ところで，物質の電気的な性質は，原子に含まれる電子（特に、原子核からの束縛が弱い外殻電子［価電子］）の振る舞いによって決まる．

電子のもち得るエネルギー（エネルギー準位）は離散化されるが，多数の原子が集まって結晶などを形成しているような場合には，僅かに値の異なるエネルギー準位が多数集まった帯状構造（バンド構造）をなすことになる．

半導体では，価電子の作る価電子帯と，その上方に，使用できるエネルギー準位の存在しない禁制帯を挟んで存在する，伝導帯とが電気伝導に深く関係する．なお，半導体には真性半導体と［シリコンなどの半導体に不純物を加えて作る］不純物半導体があり，不純物半導体では，不純物により作られる新たなエネルギー準位（ドナー準位［n 形半導体］，アクセプタ準位［p 形半導体］）が重要な役割を果たす．

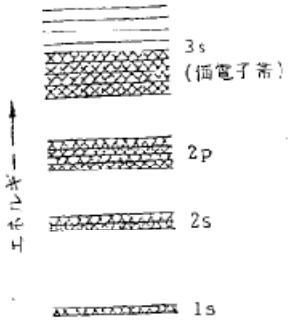
実験で使用する半導体センサに関しては，サーミスタは半導体本来の性質を用いる温度センサであり，フォトダイオードは，ｐ 形とｎ形２種類の不純物半導体を接触させて作る接合（ｐｎ接合）のもつ性質を用いる光センサである．

半導体では，価電子帯にあるエネルギー準位はすべて電子で占められているため，電子は禁制帯の幅を越えるエネルギーを受け取って初めて伝導帯に励起されて自由電子として電気伝導に寄与する（電流が流れる）．サーミスタでは外からの熱エネルギーによって励起された電子により電流が流れる．従って，高い温度の熱源からの熱エネルギーを受け取るほど電気抵抗が低くなる．

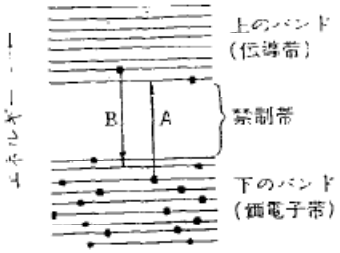
不純物半導体では，ｎ形の場合には伝導帯に近接して電子を供給する新たな準位（ドナー準位）が作られ，僅かなエネルギーで自由電子が作られるし，ｐ形の場合には，価電子帯に近接して電子を受け取る新たな準位（アクセプタ準位）が作られ，僅かなエネルギーで自由に動ける正孔（hole 正電荷）が作られて電気伝導に寄与する．

ｐ形とｎ形を接合して作られるｐｎ接合では，濃度差によりｐ側に電子，ｎ側に正孔が拡散移動し，接合付近に自由に動ける電子や正孔（キャリア）がほとんど存在しない空乏層が生じると同時に，ｎ側が正，ｐ側が負となる電界（内部電界）が生じる．

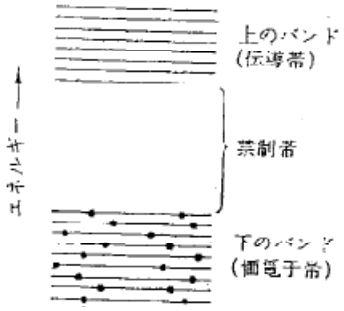
pn 接合に禁制帯の幅を越えるエネルギーをもつ光が入射すると，空乏層に多数の電子・正孔対が作られ，内部電界により，電子と正孔が，それぞれ，ｎ側とｐ側に移動して，ｐ側が正，ｎ側が負となる起電力が発生し，一種の電池が作られたと見なすことができる（太陽電池）．



1個の金属のエネルギー準位図。価電子帯より下の準位と価電子帯の下半分は，電子で満たされている

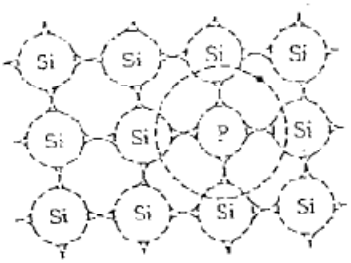


半導体では，禁制帯をはさして電子の移動がある

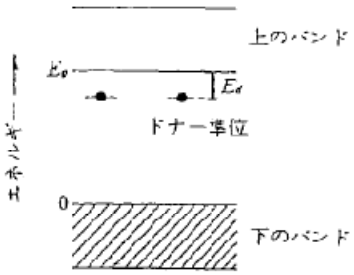


ダイヤモンドのエネルギー準位図。上のバンドは空である

n形半導体

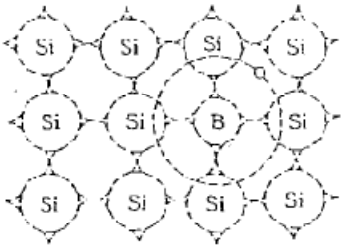


シリコン原子の位置にリン原子が置き換わった状態

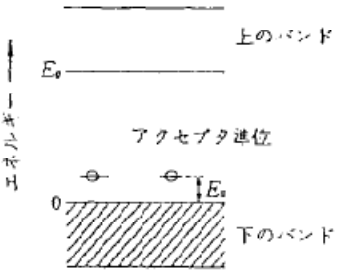


リン原子の5番目の価電子は，上のバンドの底からわずか離れたところの準位に存在する

p形半導体



シリコン原子の位置にボロン原子が置き換わった状態



ボロン原子は価電子が1個不足しているため，下のバンドのすぐ上に準位をつくる

いくつかの物質の禁制帯の幅の値〔eV〕

ダイヤモンド	~6
シリコン	1.1
ゲルマニウム	0.67
ガリウムヒ素	1.35

シリコンにおける不純物のイオン化エネルギー〔eV〕

ドナー		アクセプタ	
P	0.050	B	0.044
As	0.053	Al	0.069
Sb	0.043	In	0.155

渡辺英夫著：半導体工学，コロナ社（2001）より

実験の進め方

実験内容を理解もせず，ただ闇雲に作業を繰り返すのは実験でも何でもなく，何の得るところもない．常に頭脳を使い，実験の意味を考えながら進めること．

・データを取り始める前に制御変数（実験者が変える変数：力，温度等［独立変数ともいう］）の変化による出力（従属変数）の概略の変化を調べ，単調変化になりそうかどうかを確認　する．確認の上でデータを取り始める．単調変化でなければ配線，手順などを，注意深く　再点検する．思い通りでないときこそ，自分を鍛える絶好のチャンスである．
・出力電圧の変化が見られる範囲で，制御変数を８～１０個変えて測定し，制御変数と出力　電圧の値を記録する．有効数字に注意すること．
・アナログ形の計器（押し秤，温度計など）の目盛は，必ず，最小目盛の１桁下まで読み取　る．力，温度，距離などの読み取り桁数（有効数字）は２桁以上とする．
・制御変数を変えても出力電圧の変化が見られない，あるいは，極く少ない場合には，演算　増幅器のフィードバック抵抗（可変抵抗）のツマミを右に回して抵抗値を大きくし，増幅　率を上げる．

単調変化：制御変数を大きくしていったとき，出力電圧が制御変数につれて，傾向として，次第に大きくなっていく（単調増加）か，逆に，次第に小さくなっていく（単調減少）変化．変化の傾向が大きく変化しない（大きくジグザグの変化をしない）ことをいう．

◆ レポートの書き方や，グラフの描き方に関しては**ハードウエア実験１の説明書（基礎編）**を参照のこと．実験を実施してもレポートが劣悪では、折角の実験が活かせないし，単位取得も難しくなる．

参考：実験データの記録書式の例

20XX年　月　日

ストレインゲージ実験

力(荷重)と出力電圧の関係

力(荷重)			出力電圧(V)
押し秤読み	初期値	荷重(kgw)	

20XX年　月　日

サーミスタ実験

温度と出力電圧の関係

温度(℃)	出力電圧(V)

20XX年　月　日

ホール素子実験

磁石の素子までの距離と出力電圧の関係

素子−磁石間 距離(cm)			出力電圧(V)
磁石位置(cm)	素子位置(cm)	距離(cm)	

20XX年　月　日

フォトダイオード実験

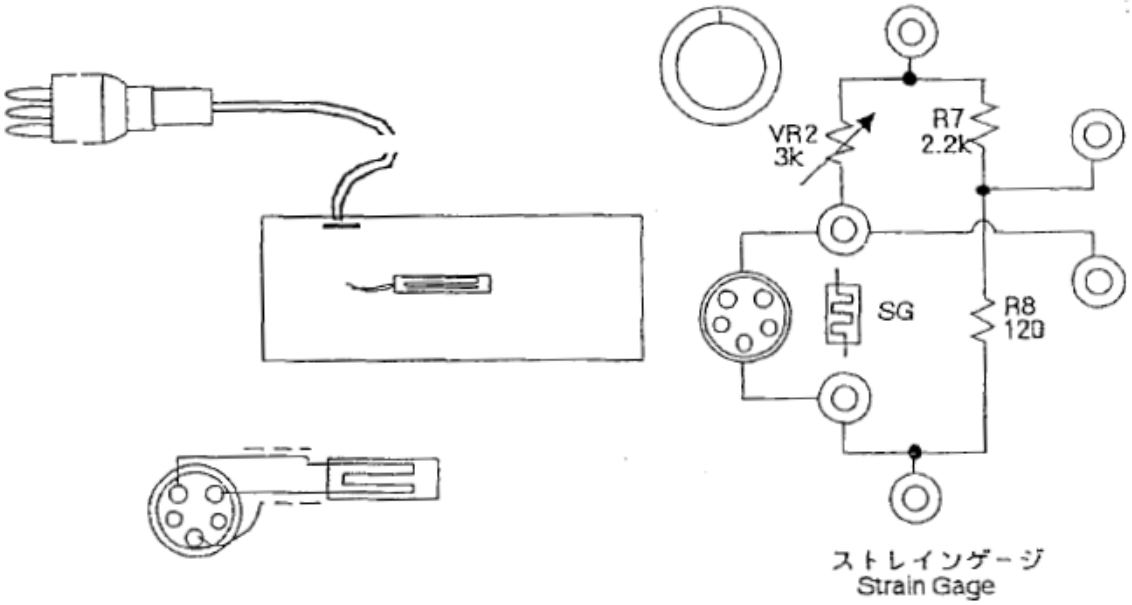
照度と出力電圧の関係

照度(Lux)	出力電圧(V)

３．使用センサ素子

3.1 ストレインゲージ（Strain Gauge［Gage］）

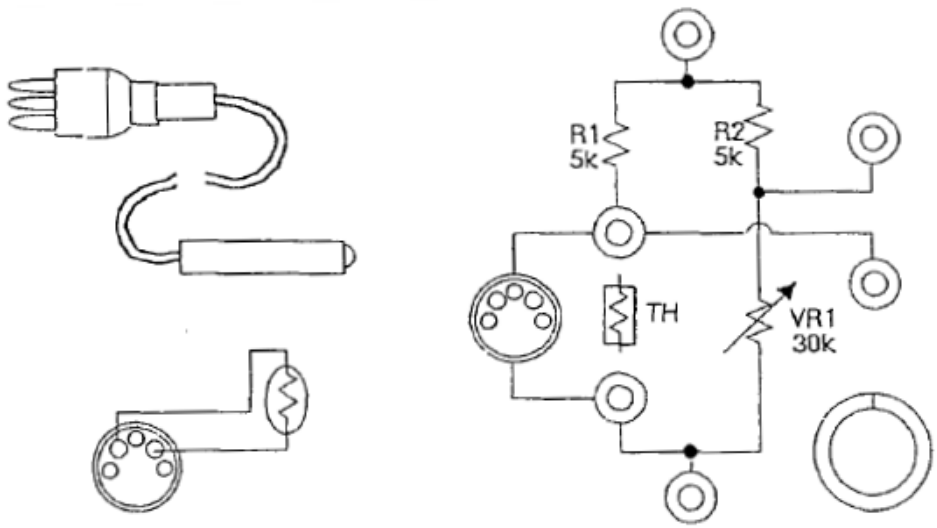
極く細い金属抵抗線を弾性板に特殊なパターンとして接着して製作したもので，弾性板に生じる歪み(strain)により抵抗線に抵抗変化が生じることを利用する．抵抗の変化をブリッジ回路で電圧変化として取り出す.



ストレインゲージ
Strain Gage

3.2 サーミスタ（Thermistor）

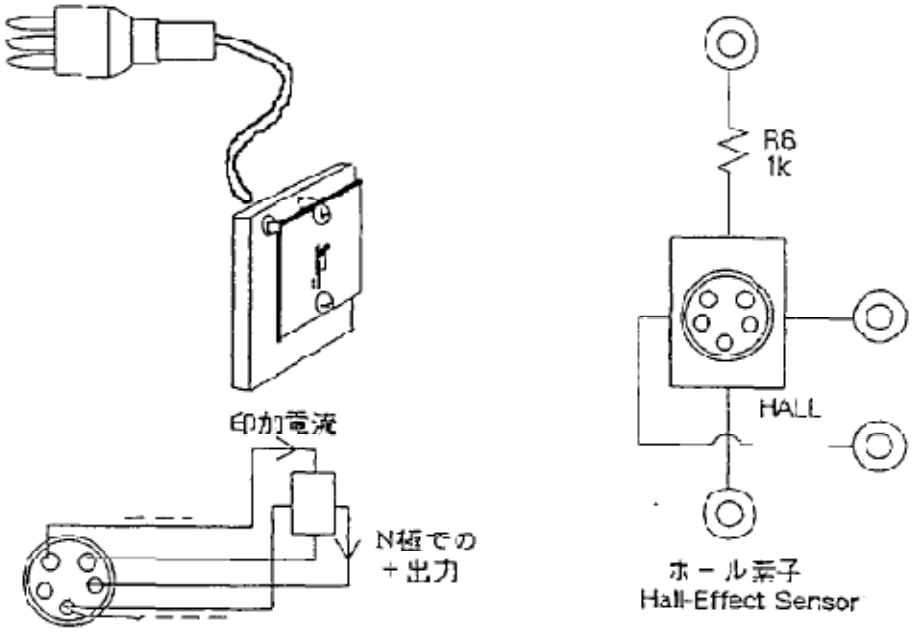
温度によって抵抗値が変化する半導体素子, ブリッジ回路の１辺に挿入し, 抵抗の変化を電圧変化として取り出す．実験で使用する素子は，ガラスビーズ形のサーミスタを金属パイプの先端に取り付けたものである.



サーミスター
Thermister

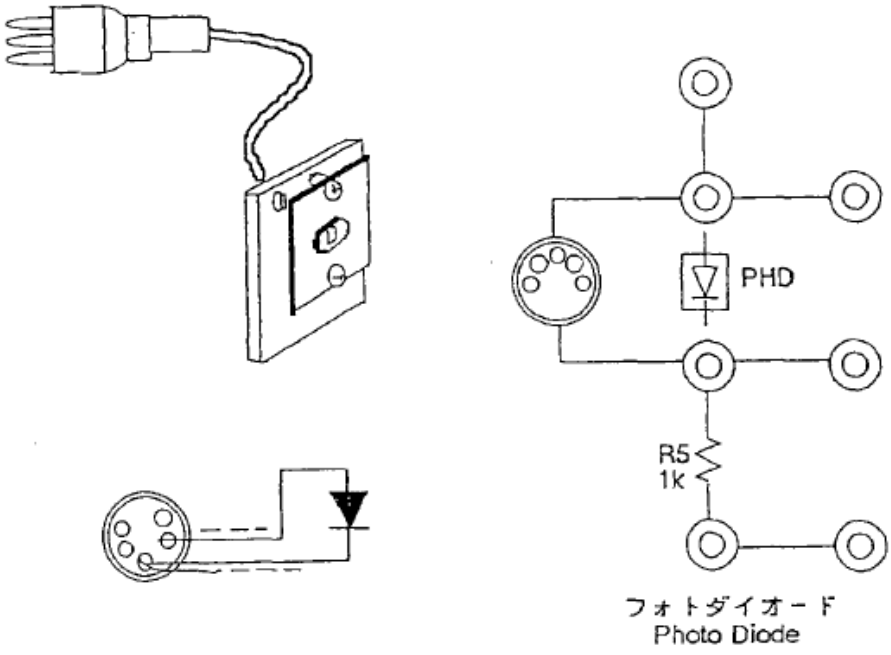
3.3 ホール素子（Hall Effect Sensor）

Ga，As を主成分とした素子で，ホール効果により、ホール電流を流した状態で磁束密度に比例したホール電圧が発生する．ホール電圧は，磁束の向き（N 極，S 極）により符号　　（正，負）が変わる．



3.4 フォトダイオード（Photodiode）

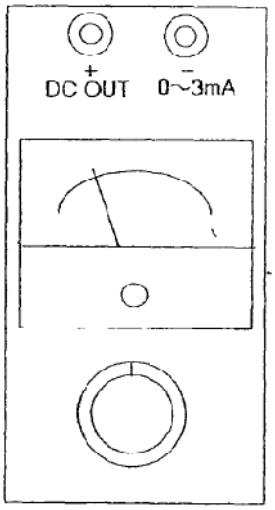
セラミックケースに内蔵されたシリコンフォトダイオードで，入射光量に比例した出力が取り出せる．実験では入射光量による起電力（電圧）の変化を測定する．



４．実験手順

〈以下，全実験でセンサ実習装置＊とディジタル電圧計(マルチメータ)を用いる〉

4.0 電源と演算増幅器



(1) **直流(DC)電源**　ブリッジ回路の電源として，あるいは，サーミスタ，ホール素子に電流を供給するために使用する定電流電源(0～3 mA)．

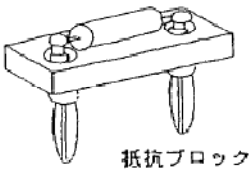
＊　本資料の図は，ほとんどを下記説明書より引用

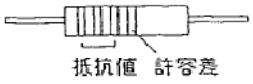
島津理化器械株式会社
取扱説明書　センサ実習装置　SNS-10N

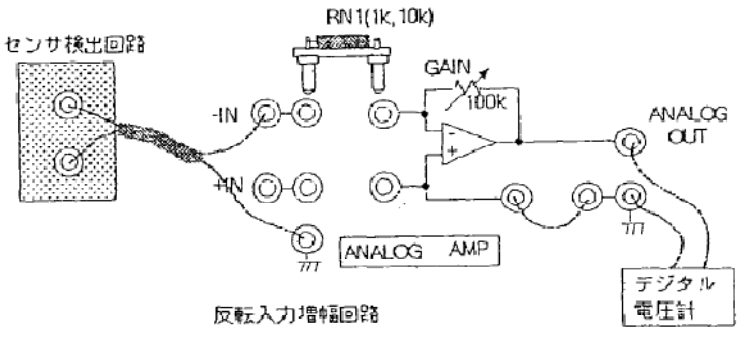
(2) **演算増幅器**（Operational［Analog］Amplifier）　アナログ形センサからの信号を増幅するために使用する増幅器で，付属の抵抗ブロックを端子間に挿入し，反転増幅回路として用いる．

反転増幅回路　図のように入力抵抗R_i，フィードバック抵抗R_Fとすると，増幅率は$-R_F/R_i$となる．つまり，出力電圧＝ $-(R_F/R_i)$ ×入力電圧

なお，演習装置ではフィードバック抵抗が可変抵抗となっており，つまみを回して抵抗値を変えることができる．







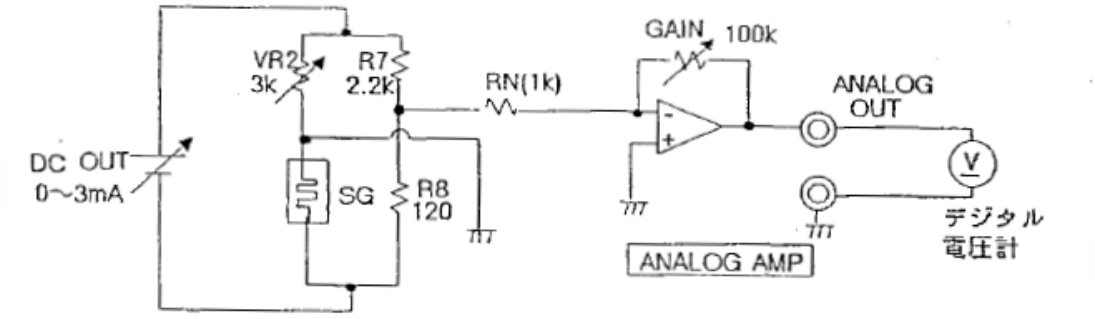
4.1 ストレインゲージ（Strain Gauge）［力，圧力センサ］

［1］使用機材，用品

ストレインゲージ
支持台
押し秤（はかり）

［2］回路図

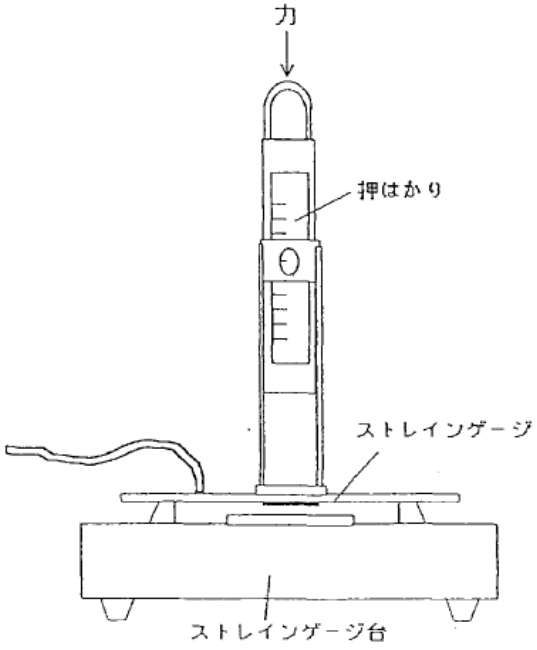
図のように，慎重に配線する． グラウンド（アース）の配線を忘れないように．
配線は，１つ１つの線を順番にチェックして確認する．



ストレインゲージ実習回路

［3］実験手順

1）ストレインゲージ素子（抵抗線）を下側にし，センサ板を支持台に載せる．
2）電源のツマミを回して，約 2 mA の電流を流すように調節する．
3）力を加えない状態でブリッジの可変抵抗 VR2 のツマミを回し，出力電圧が ほぼ 0 V となるように調整する．
4）押し秤をセンサ板のほぼ中央に載せ，力を加えない状態で押し秤の目盛を読み，記録する（初期値）．0 目盛より上なら正，下なら負とする．
目盛の読みは，目盛の最小桁の１桁下まで目分量で読み取る．
5）押し秤の上部から力を加えて秤を押し下げる．
力（荷重）［重量 kg：kgf or kgw］は読み取った目盛の値から初期値を差し引いて求める．即ち，
荷重＝押し秤の読み－初期値 とする．
なお，押し秤の目盛と出力電圧の値は同時に読み取り記録する．



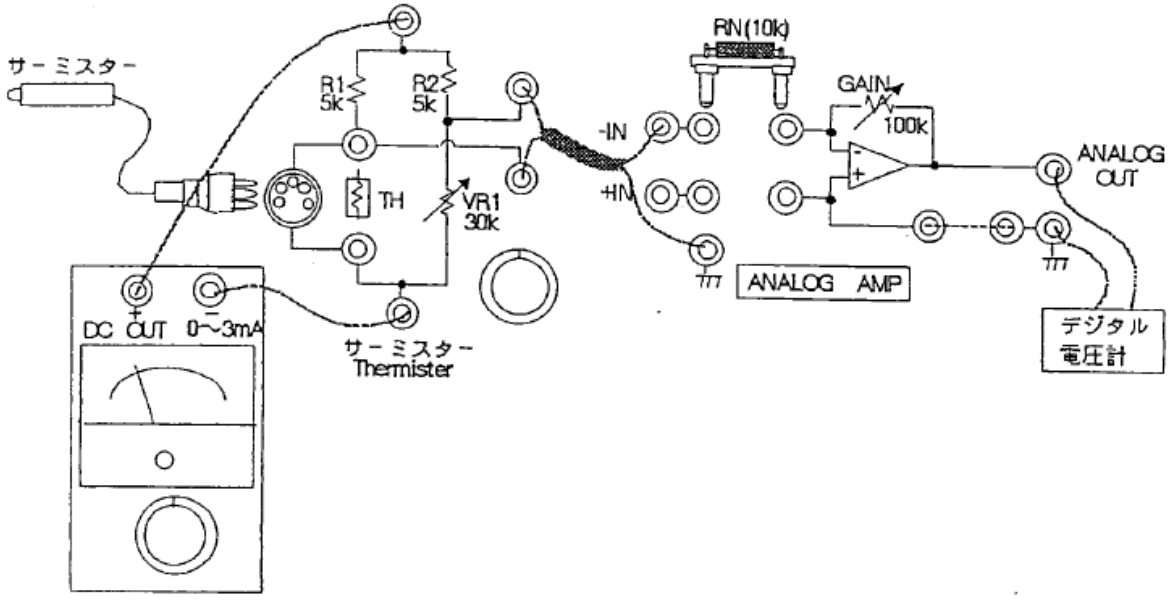
4.2 サーミスタ（Thermisitor）［温度センサ］

［１］使用機材，用品

サーミスタ
ビーカー＆発泡スチロール台
棒温度計（アルコール温度計）
撹拌棒
ティーサーバ，プラスチックコップ
電気ポット，氷削り器（机上に設置 移動しない）

［２］回路図

図のように，慎重に配線する．グラウンド（アース）の配線を忘れないように．
配線は，１つ１つの線を順番にチェックして確認する．



［３］実験手順

1) ビーカに水と氷を入れ，温度計で確認しながら，ほぼ 0 ° C とする．
　　ビーカに入れる水や湯は，半分程度とする（多すぎないように）．

2) サーミスタをビーカに入れ，電源の調整ツマミを回して，約 0.5 mA の電流が流れるように調整する．

3) 演算増幅器の出力電圧をディジタル電圧計で見ながら，ほぼ 0 V となるように，ブリッジ回路の可変抵抗 VR1 を調整する．

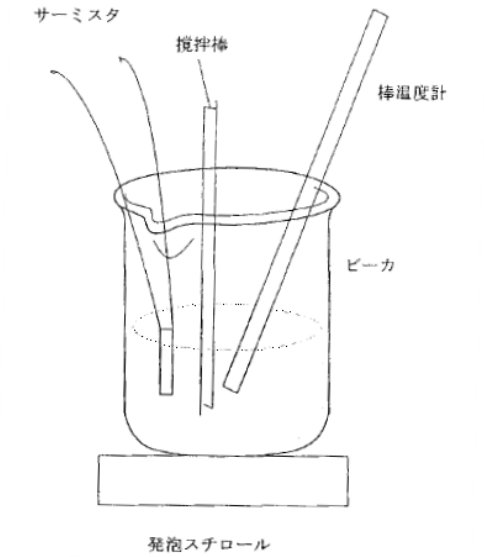
4) ビーカの氷水を僅かに残して湯をつぎ足して，75 ° C 前後とし，湯を撹拌しながら，温度計の読みと出力電圧を同時に読み取り，記録する．
　　［注意：温度計の読みは最小桁の 1 桁下まで目分量で読む．値は２桁以上］

5) ビーカの湯の温度を変えながら，温度計の読みと出力電圧とを記録する．

注意：本実験では，ガラス製品と高温の湯を使うので，怪我(けが)や火傷(やけど)をしないように十分注意深く扱うこと　　湯は，必ず，取手の付いたティーサーバーで運ぶこと

注意：温度は一定の方向で変える必要はない．知恵を働かせ，少ない手数で必要な範囲の測定を実施する．

注意：実験終了後は，使用したセンサ，備品など すべて **よく拭き，水分が残ってないことを確認**した上で返却すること



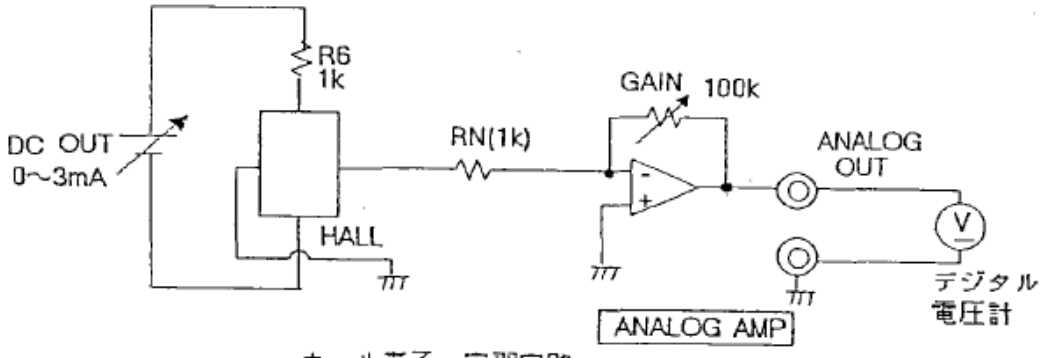
4.3 ホール素子（Hall Effect sensor）［磁気センサ］

［１］使用機材，用品

ホール素子 ＆ センサ台
棒磁石 ＆ センサ台　（磁石はセンサ台にテープで固定する）
物差し

［２］回路図

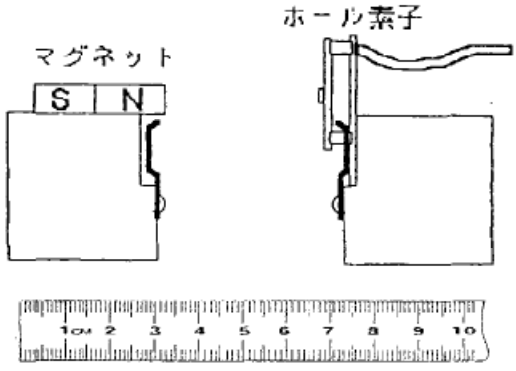
図のように，慎重に配線する．グラウンド（アース）の配線を忘れないように．
配線は，１つ１つの線を順番にチェックして確認する．配線終了後，ホール素子に磁界を掛けない状態で出力電圧がほぼ０Ｖであることを確認する．



ホール素子　実習回路

［３］実験手順

1) 棒磁石の N 極（赤色）をホール素子に向け，ホール素子と磁石を対置させる．
2) 電源のツマミを回して，ホール素子に約 3 mA の電流を流す（一定であれば少なくてもよい．
3) 磁石とホール素子の距離を変え，その距離を物差しで測定する．距離測定は，ホール素子の位置での物差しの読みと，磁石の位置での読みとの差を求めることで実行する．



4) それぞれの読みと求めた距離，出力電圧の値を記録する．
5) 磁石の向きを逆にし[S 極(濃紺色)をホール素子に向け]て，同様の測定を行う．

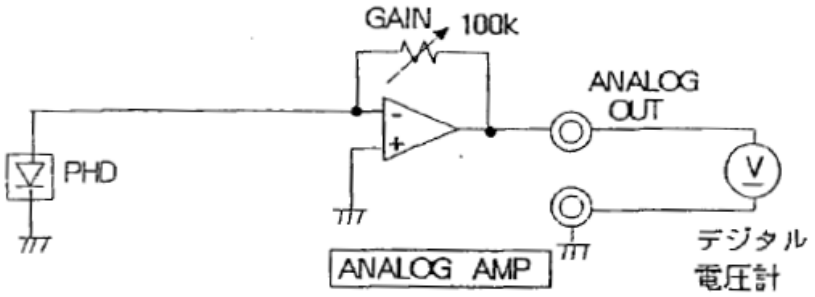
4.4 フォトダイオード（Photo-diode）［光センサ］

［1］使用機材，用品

［暗室］
フォトダイオード & センサ台
照度計
スライダック，電球（机上に設置 移動しないこと）

［2］回路図

図(短絡モード)のように，慎重に配線する．グラウンド(アース)の配線を忘れないように．配線は，１つ１つの線を順番にチェックして確認する．



フォトダイオード実習回路(短絡モード)

［3］実験手順

1) フォトダイオードをセンサ台に差し込む．
2) 光源（電球）をフォトダイオードの中央に対置させ，動かないように固定する．
3) 光源から，フォトダイオードとほぼ同じ距離に照度計を設置する．
4) 光源の明るさを，スライダックのツマミを回して調節しながら，照度計の読み(Lux)とフォトダイオードからの出力電圧を読み取り記録する．